

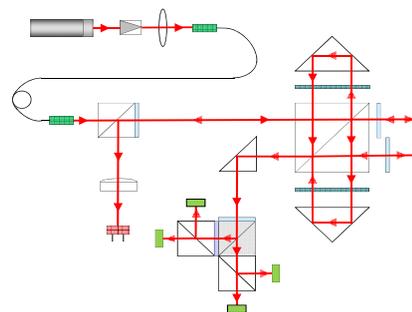


## 共光路三自由度激光测量系统

伍婷婷<sup>1</sup>, 黄强先<sup>1\*</sup>, 张芮<sup>1</sup>, 武万多<sup>1</sup>,  
王超群<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>合肥工业大学仪器科学与光电工程学院, 合肥 230009;

<sup>2</sup>合肥工业大学电子科学与应用物理学院, 合肥 230009



**摘要:** 基于迈克尔逊干涉原理和激光自准直原理, 采用共光路布局, 研制了能对运动工作台同时进行一维位移和二维角度测量的三自由度激光测量系统。在位移测量中, 采用光程差放大技术, 并结合偏振干涉技术和信号差分处理, 得到高质量的位移输出信号和高分辨力的位移测量结果。在角度测量中, 运动工作台的偏摆和俯仰运动会引起固定在工作台上的反射镜位置变化。入射光被反射镜反射, 并被四象限探测器探测, 根据四象限探测器上的光斑位置变化, 获得偏摆角和俯仰角的变化值。对研制的系统进行稳定性和分辨力测试, 同时与英国雷尼绍 XL-80 激光干涉仪进行比对实验。实验结果表明: 测量系统的位移分辨力为 0.8 nm, 角度分辨力为 0.2"; 在 50 mm 的测量范围内, 与雷尼绍 XL-80 激光干涉仪测量值相比, 系统的位移最大偏差小于 100 nm, 偏摆角最大偏差为 0.5", 俯仰角最大偏差为 0.4"。

**关键词:** 共光路; 激光; 偏振干涉; 自准直; 同时测量

中图分类号: TH744

文献标志码: A

## Three-degree-of-freedom common-path laser measurement system

Tingting Wu<sup>1</sup>, Qiangxian Huang<sup>1\*</sup>, Rui Zhang<sup>1</sup>, Wanduo Wu<sup>1</sup> and Chaoqun Wang<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>School of Instrument Science and Opto-electronics Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; <sup>2</sup>School of Electronic Science and Applied Physics, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China

**Abstract:** Common optical path arrangement was adopted to design a three-degree-of-freedom laser measurement system for measuring 1D displacement and 2D angles of a moving stage simultaneously on the basis of the principles of Michelson interference and laser auto-collimation. In the displacement measurement, the fine resolution of displacement measurement was achieved by using optical path difference doubling technique. Combined with polarization interference technology and signal differential processing, high-quality displacement output signal was obtained. In the angle measurement, changes in yaw and pitch of a moving stage caused the position change of the mirror which was mounted on the stage. The incident beam was reflected by the mirror and detected by a four-quadrant detector. According to the position change of the spot, yaw and pitch angles were obtained. The stability, resolution tests and the comparison experiments with the British Renishaw XL-80 laser interferometer were done. Experimental results show that the system has the resolution of 0.8 nm for displacement measurement and 0.2" for angle measurement. Compared with the results of Renishaw XL-80 laser interferometer, the maximum deviation of displacement is less than 100 nm within the measurement range of 50 mm. The maximum deviations of yaw and pitch are 0.5" and 0.4".

收稿日期: 2017-05-04; 收到修改稿日期: 2017-07-14

\*E-mail: huangqx@hfut.edu.cn

**Keywords:** common optical path; laser; polarization interference; auto-collimation; simultaneous measurement

**DOI:** 10.3969/j.issn.1003-501X.2017.08.008

**Citation:** *Opto-Elec Eng*, 2017, **44**(8): 811–817

## 1 引言

在先进加工制造领域中,精密导轨和精密工作台是保证机床制造精度和仪器测量精度的重要运动部件。导轨和工作台的精确安装与调整,以及它们在空间的位置与运动的检测和控制等,都需要对多个空间参数进行同时测量。而传统的测量仪器,比如 HP5529A 动态校正装置和雷尼绍激光干涉仪,安装一次仅能测量一个参数,且测量过程较为繁琐<sup>[1,2]</sup>。因此,如何实现多自由度同时测量已成为国内外相关领域的研究重点之一。

目前,国内外研究机构和生产厂商对上述问题展开了相关研究。例如,德国 SIOS 公司的 SP-15000TR 三光束激光干涉仪<sup>[3]</sup>可以对位移和角度同时进行测量,位移测量分辨力为 0.1 nm,角度测量分辨力为 0.04"。虽然通过间接的测量方法能够获得角度测量值,但其引入误差大,结构装置复杂,且装调不易。韩国 Kim 教授<sup>[4]</sup>等人所设计的紧凑型角度、位移同时测量系统,干涉测长分辨力为 1.2 nm,角度测量范围为 $\pm 30''$ ,其分辨力为 0.2",仅能够应用于小行程的纳米工作台,而无法满足大行程的测量要求。北京交通

大学冯其波教授<sup>[5]</sup>等人采用三个面阵 CCD 来探测三路准直光斑的位置变化,以实现被测物体的六自由度同时测量,在相应的测量范围内,位移最大偏差可达到 1  $\mu\text{m}$ ;角度最大偏差为 1.27"。因此,对于简化测量结构,提高测量精度以及扩大测量范围等仍需要进一步研究。

本文基于迈克尔逊干涉原理和激光自准直原理,利用同一测量光路,研制了能对一维位移和二维角度同时进行测量的三自由度激光测量系统,可实现大行程、高精度、非接触测量。下面将从系统的光路布局、测量原理、信号处理以及实验方面进行分析和验证。

## 2 测量原理

激光干涉仪是一种广泛应用于高精度位移测量的仪器,具有高分辨率、可追溯性、结构简单等特点<sup>[6-8]</sup>,而自准直仪是一种利用光的自准直原理将角度测量转换为线性测量的计量仪器,能够实现小角度、平直度的精密测量。在同一光路中,将激光干涉仪和自准直仪相结合,可实现位移和角度的同时测量。采用共光路布局和偏振干涉技术<sup>[9]</sup>,设计了结构简单的激光测量光路,光路原理图如图 1 所示。由稳频 He-Ne 激光

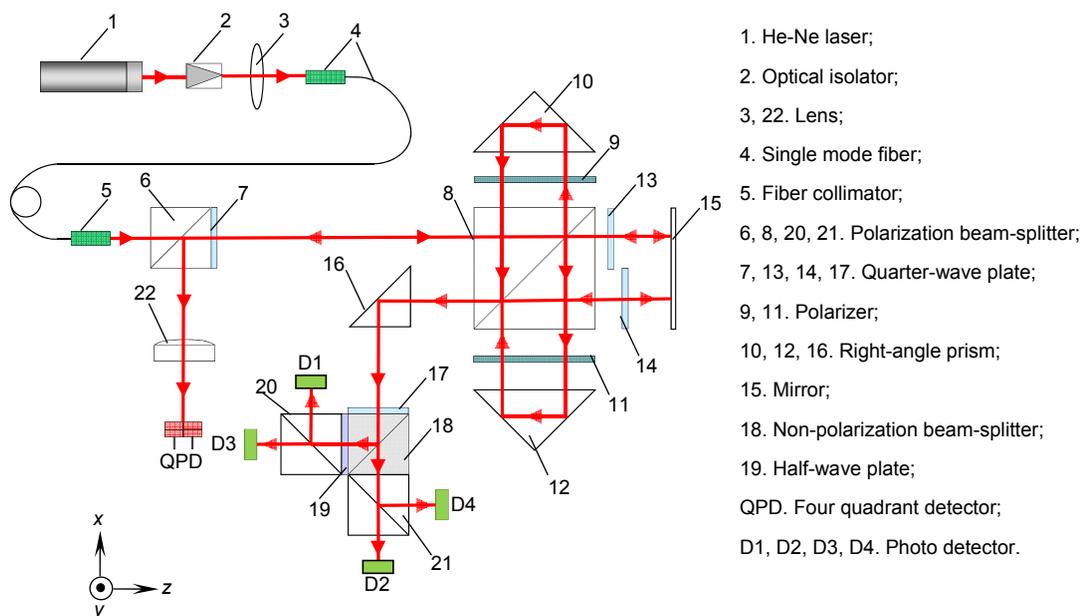


图 1 光路原理图。

Fig. 1 The schematic diagram of the optical path.

器 1、光隔离器 2、聚焦透镜 3、单模光纤 4、光纤准直器 5 组成光纤输出光源,可以避免氦氖激光器发热所带来的热误差,提高系统测量精度。光纤准直器出射的准直光入射到反射镜上,并被反射回来,反射光经过偏振分光棱镜被分为两部分,一部分光被反射用于激光干涉测量位移,另一部分光被透射用于自准直仪测量角度。

## 2.1 位移测量

位移测量是通过四倍频干涉光路来实现的,采用偏振光移相技术,解决了光强“零漂”的问题<sup>[10]</sup>,从而获得两路相互正交的干涉信号。如图 1 所示,光纤准直器 5 出射的线偏振 P 光,经过偏振分光棱镜 6 和四分之一波片 7 后,在偏振分光棱镜 8 的分光面上被分为光强比为 2:1 的 P 光和 S 光。S 光通过偏振片 9,其透光方向为 S 光方向,可以较好地消除 P 光的干扰,后由直角棱镜 10 两次反射,再次通过偏振片 9,并被偏振分光棱镜 8 反射,最终输出 S 光。P 光经过四分之一波片 13,到达反射镜 15 被反射回来,再次通过四分之一波片 13 输出 45°线偏振光,并由偏振分光棱镜 8 分为光强相等的 P 光和 S 光。S 光经过偏振片 11 和直角棱镜 12,在偏振分光棱镜 8 的分光面上被反射,输出仍为 S 光。S 光两次通过四分之一波片 14,变为线偏振 P 光,并从偏振分光棱镜 8 出射。

入射到直角棱镜 16 的两路正交的线偏光(测量 P 光和参考 S 光),经过四分之一波片 17 变为左、右旋的圆偏光,并由消偏振分光棱镜 18 分成光强相等的两路光。一路光经过偏振分光棱镜 21 形成两路相位差为 180°的干涉信号;另一路光经过半波片 19 进行移相,再经过偏振分光镜 20 也形成两路相位差为 180°的干涉信号,且四路信号的相位差分别为 90°。四路正交

干涉信号由光电探测器接收,并可表示为

$$I_n = a^2 \left\{ 1 + \cos \left[ \varphi + (n-1) \frac{\pi}{2} \right] \right\}, \quad (1)$$

其中:  $a$  为测量光和参考光的振幅,  $\varphi$  为测量光和参考光之间的相位差,  $n$  为 1、2、3、4 路通道。

四路干涉信号经差分处理得到较为理想的两路正交信号,两路信号满足:

$$\frac{I_y}{I_x} = \frac{I_4 - I_2}{I_1 - I_3} = \tan \varphi. \quad (2)$$

当反射镜移动时,移动位移  $L$  与测量光和参考光的相位差  $\varphi$  之间的关系为

$$L = \frac{\varphi}{8\pi} \lambda. \quad (3)$$

测量光束两次射入反射镜,光程差得以放大四倍,从而提高了位移测量分辨率。

## 2.2 角度测量

偏摆角和俯仰角是基于自准直原理来进行测量的,其具体测量光路由图 1 中的偏振分光棱镜 6 和 8、四分之一波片 7、四分之一波片 13、反射镜 15、平凸透镜 22 和四象限探测器 QPD 组成。测量原理如图 2 所示,当反射镜转动  $\alpha$  角时,光线按反射定律与原光线成  $2\alpha$  角返回,通过平凸透镜聚焦后成像在四象限探测器上。反射镜运动所引起的偏摆角  $\theta_y$  和俯仰角  $\theta_x$ ,在角度较小时可近似表示为

$$\begin{cases} \theta_y = \frac{x_y}{2f} \\ \theta_x = \frac{x_p}{2f} \end{cases}, \quad (4)$$

其中:  $f$  为平凸透镜的焦距,  $x_y$  和  $x_p$  分别为由偏摆角和俯仰角所引起的光斑的位置偏移量。

根据四象限探测器<sup>[11]</sup>获得的信号计算得到角度

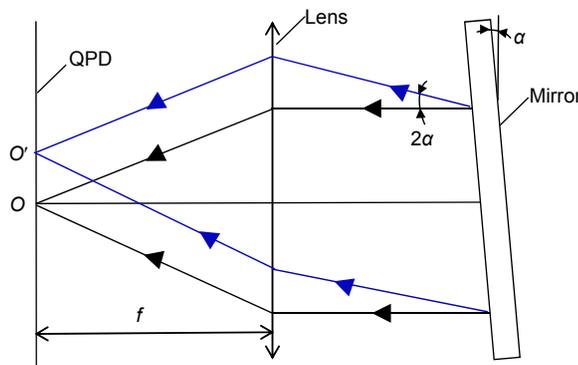


图 2 角度测量原理。

Fig. 2 The principle of angle measurement.

值。将四象限探测器上四个象限所接收的信号记为  $V_i$  ( $i=1, 2, 3, 4$ ), 偏摆角和俯仰角可以由以下公式表示:

$$\begin{cases} \theta_Y = K_Y \Delta_Y \\ \theta_P = K_P \Delta_P \end{cases}, \quad (5)$$

其中:  $K_Y$  和  $K_P$  是标定常数, 通过多次实验拟合得到。 $\Delta_Y$  和  $\Delta_P$  可被定义为

$$\begin{cases} \Delta_Y = \frac{V_1 + V_2 - V_3 - V_4}{V_1 + V_2 + V_3 + V_4} \\ \Delta_P = \frac{V_2 + V_3 - V_1 - V_4}{V_1 + V_2 + V_3 + V_4} \end{cases}. \quad (6)$$

### 3 系统设计

三自由度激光测量系统的总体设计如图 3 所示。基于共光路布局和偏振干涉技术, 优化测量光路结构, 提高了测量系统的稳定性。测量系统主要分为位移测量和角度测量两部分。在位移测量中, 基于四倍频偏振干涉光路, 采用四通道探测原理, 获得四路正交的干涉光信号, 并由四个相同的光电探测器接收, 经前置放大电路转化为四路正交的电压信号, 再经后级电路处理, 有效地减小了原始信号中所存在的直流偏移误差、不等幅误差和非正交误差<sup>[12-14]</sup>, 从而得到两路正交测量信号。采用高速相位细分采集卡 PCI-GS2200 对电路输出的正交信号进行连续采集和相位细分。对于测量系统, 激光光源采用美国索雷博公司的 HRS015B 稳频 He-Ne 激光器, 频率稳定性为  $\pm 2$  MHz (其相对频率稳定性为  $4.2 \times 10^{-9}$ )。结合图 1 中的光学四倍频和采集卡的 200 倍相位细分, 位移测量分辨力约为 0.79 nm。通过温湿度和气压传感器对环境参数进

行检测并输入计算机, 实现对波长的实时修正。同时, 通过软件算法对测量信号进行数字滤波处理, 最终获得位移输出信号。

在角度测量中, 运动工作台的偏摆和俯仰运动会引起固定在工作台上的反射镜位置变化。入射光被反射镜反射, 并被四象限探测器接收, 根据四象限探测器上的光斑位置变化, 获得偏摆角和俯仰角的变化值。四象限探测器的电流输出经前置放大电路转化为四路电压信号, 后经后级电路处理, 可以得到两路角度测量电信号。利用数据采集卡采集与角度变化所对应的电压信号, 并通过计算机实时处理测量数据, 从而得到二维角度测量值。

### 4 实验结果及分析

为了验证本激光测量系统的有效性, 利用实验室自制的宏微工作台, 在恒温室中对测量系统进行角度标定、稳定性和分辨力测试以及比对实验。该宏微工作台由一个大行程宏动工作台和一个小行程微动工作台组成, 既可以实现快速、大行程的平动, 又可以实现多个自由度的运动, 例如小行程的平动、偏转、俯仰等。

#### 4.1 角度标定

通过模拟输出卡和电压放大器给微动工作台相应位置的压电陶瓷致动器提供电压控制信号, 使得微动工作台产生一定的偏摆角; 与此同时, 利用英国雷尼绍 XL-80 激光干涉仪角度附件与本激光测量系统实时采集测量值, 从而对偏摆角进行标定。标定结果如

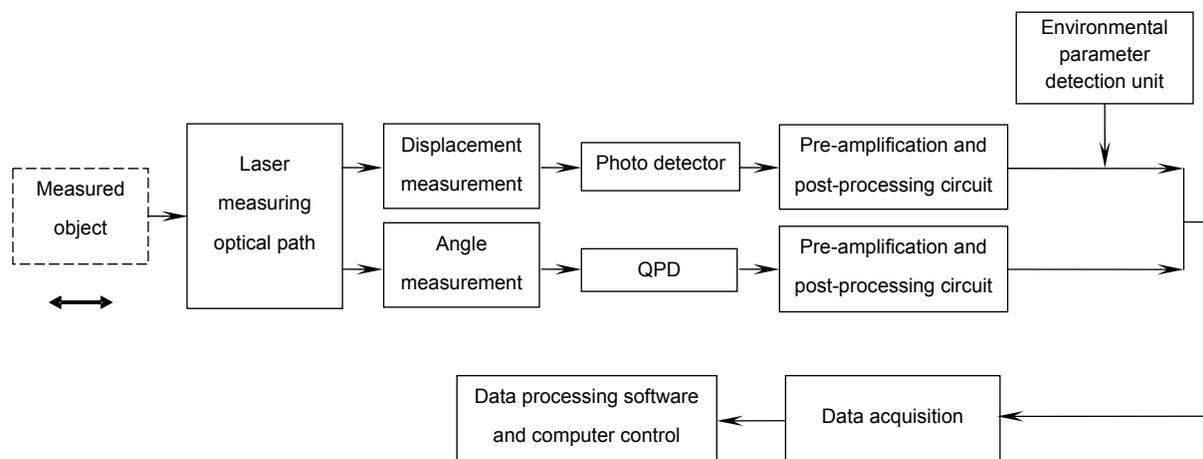


图 3 激光测量系统总体设计.

Fig. 3 General design of laser measurement system.

图 4(a)所示,由图可知,偏摆角测量范围达 $\pm 30''$ 。俯仰角标定实验操作与偏摆角相同,标定结果如图 4(b)所示。由图可知,俯仰角测量范围达 $\pm 30''$ 。

#### 4.2 稳定性测试

本系统采用美国索雷博公司的 HRS015B 稳频 He-Ne 激光器和激光单模光纤组件,极大地提高了测量系统的稳定性。在恒温的实验环境下,对所研制的系统进行 60 min 的漂移测试。图 5(a)和 5(b)分别为位移漂移和角度漂移。由图 5 可知,在 60 min 内,位移测量漂移最大变化量约为 120 nm;偏摆角、俯仰角测量漂移最大变化量分别为  $1''$ 、 $0.8''$ 。

#### 4.3 分辨力测试

利用信号发生器给微动工作台相应位置的压电陶瓷致动器施加方波电压控制信号,使得微动工作台产生一定的微小位移,实验室自制的微动工作台的驱动分辨力约为  $0.15 \text{ nm}$ ;与此同时,测量系统实时采集

位移输出值。测试结果如图 6(a)所示,由图可知,位移测量分辨力为  $0.8 \text{ nm}$ 。需要指出的是,位移曲线中含有一个位移偏量,其主要是因为测量系统受到外界环境等因素的影响而产生的。

通过模拟输出卡和电压放大器给微动工作台相应位置的压电陶瓷致动器提供台阶电压控制信号,使得微动工作台产生一定的微小角度;与此同时,测量系统实时采集角度输出值。测试结果如图 6(b)所示,由图可知,角度测量分辨力为  $0.2''$ 。

#### 4.4 比对实验

采用英国雷尼绍 XL-80 激光干涉仪与本激光测量系统进行比对实验。XL-80 激光干涉仪是一款商用激光干涉仪,位移测量分辨力为  $1 \text{ nm}$ ,测量精度为 $\pm 0.5 \text{ ppm}$ ;角度测量分辨力为  $0.01''$ ,测量精度为  $0.6\%$ ,满足进行比对实验的要求。将本测量系统的反射镜和 XL-80 激光干涉仪的靶镜固定在工作台上,实验时背

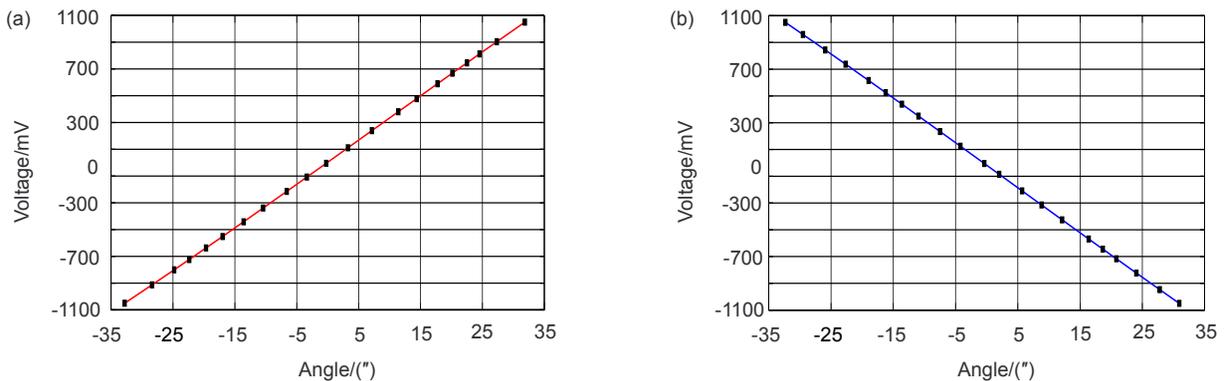


图 4 (a) 偏摆角标定结果. (b) 俯仰角标定结果.

Fig. 4 (a) Calibration result of yaw angle. (b) Calibration result of pitch angle.

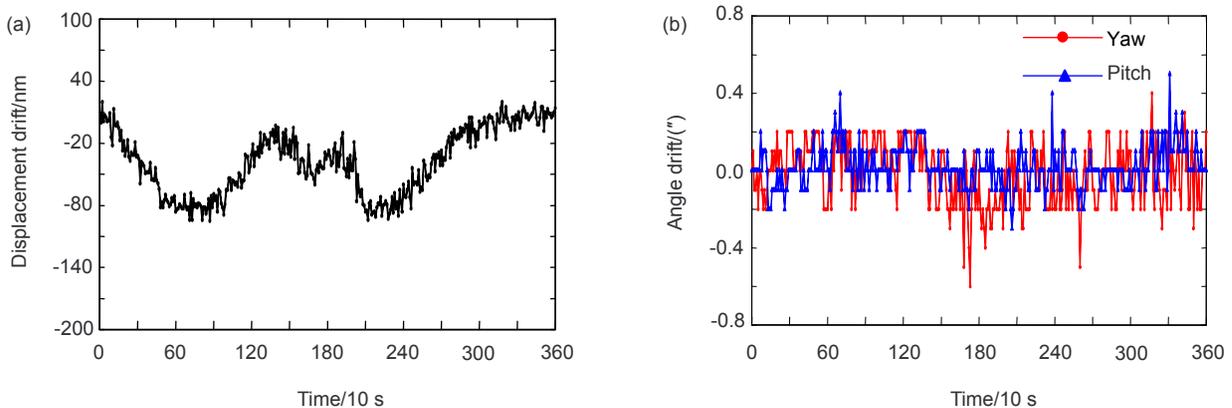


图 5 (a) 位移稳定性测试. (b) 角度稳定性测试.

Fig. 5 (a) Testing of the displacement stability. (b) Testing of the angle stability.

对背放置,尽可能使两个测量系统的测量轴线在同一轴线上,从而最大限度地减小阿贝误差。在 50 mm 的测量范围内,对所研制的系统进行位移和角度比对实验。位移比对实验时,宏动工作台每移动 2 mm,两个测量系统同时采集一个点。实验结果表明,在 50 mm

的测量范围内,本测量系统与 XL-80 激光干涉仪的最大偏差不超过 100 nm,如图 7 所示。在位移比对实验过程中,两个测量系统的测量轴线不能完全重合所导致的阿贝误差,以及工作台运动所引起的余弦误差等都对系统的测量结果产生一定的影响。

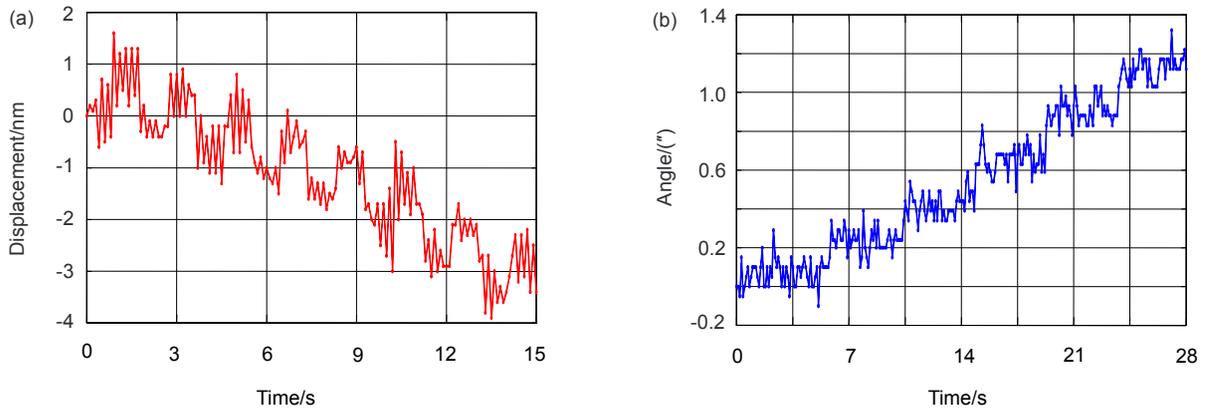


图 6 (a) 位移分辨力测试. (b) 角度分辨力测试.

Fig. 6 (a) Testing of displacement resolution. (b) Testing of angle resolution.

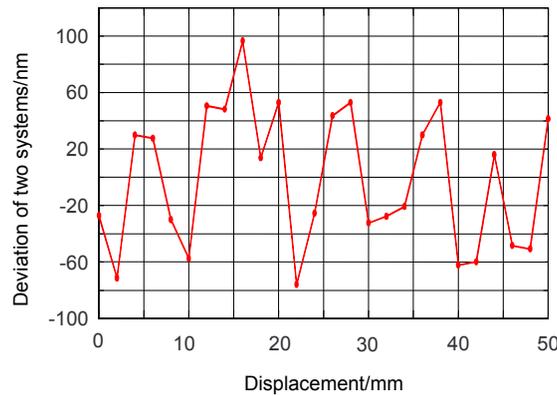


图 7 位移比对实验.

Fig. 7 Comparison experiment of displacement.

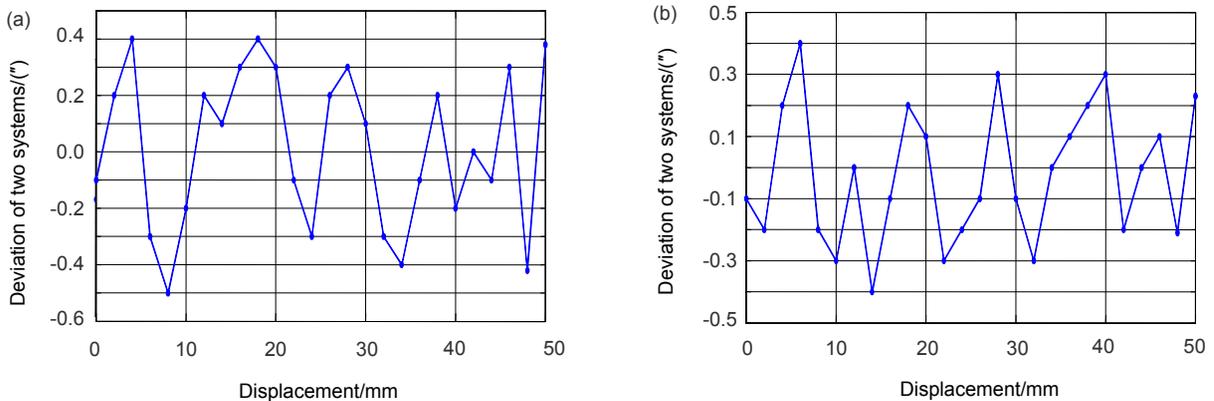


图 8 (a) 偏摆角比对实验. (b) 俯仰角比对实验.

Fig. 8 (a) Comparison experiment of yaw angle. (b) Comparison experiment of pitch angle.

工作台在运动过程中,自身会产生一定的偏摆和俯仰。偏摆角比对实验时,重新调整 XL-80 激光干涉仪的测量镜组以实现偏摆角的测量。宏动工作台每移动 2 mm,两个测量系统同时采集一个点,测量结果如图 8(a)所示。俯仰角比对实验操作与偏摆角相同,测量结果如图 8(b)所示。偏摆角最大偏差值为 0.5",俯仰角最大偏差值为 0.4"。

## 5 结 论

本文基于干涉位移测量技术和微小角度测量技术,研制了能对运动工作台同时进行一维位移和二维角度测量的三自由度激光测量系统。该系统采用共光路布局和偏振干涉技术,测量光路结构简单。对所研制的系统进行稳定性和分辨力测试以及与英国雷尼绍 XL-80 激光干涉仪比对实验。实验结果表明:测量系统的位移分辨力为 0.8 nm,角度分辨力为 0.2";在 50 mm 的测量范围内,与雷尼绍 XL-80 激光干涉仪测量值相比,系统的位移最大偏差小于 100 nm,偏摆角最大偏差为 0.5",俯仰角最大偏差为 0.4"。综上所述,所研制的激光测量系统实现了大行程、非接触、多自由度的同时测量。

## 基金项目

国家自然科学基金资助项目(51475131)。

## 参考文献

- 1 Chen Qianghua, Wu Jian, Yin Chunyong. Long range straightness/coaxiality measurement system using dual-frequency laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2002, **29**(7): 625-630.  
陈强华,吴健,殷纯永. 双频激光远程直线度/同轴度测量系统[J]. *中国激光*, 2002, **29**(7): 625-630.
- 2 Kuang Cuifang, Feng Qibo, Zhang Bin, et al. Study of the method for measuring four-degree-of-freedom geometric errors of a linear stage[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2005, **32**(9): 1266-1270.  
匡萃方,冯其波,张斌,等. 直线导轨四自由度同时测量方法的研究[J]. *中国激光*, 2005, **32**(9): 1266-1270.
- 3 Shanghai Jaeger Precision Instrument Co., Ltd. SP-15000TR three-beam laser interferometer[EB/OL]. (2014-01) [2017-04]. <http://www.shjaeger.com/product/128.html>.

- 上海耶葛精密仪器有限公司. SP-15000TR 三光束激光干涉仪[EB/OL]. (2014-01) [2017-04]. <http://www.shjaeger.com/product/128.html>.
- 4 Kim J W, Kang C S, Kim J A, et al. A compact system for simultaneous measurement of linear and angular displacements of nano-stages[J]. *Optics Express*, 2007, **15**(24): 15759-15766.
  - 5 Lü Yong, Feng Qibo, Liu Lishuang, et al. Six-degree-of-freedom measurement method based on multiple collimated beams[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, **43**(11): 3597-3602.  
吕勇,冯其波,刘立双,等. 基于多准直光的六自由度测量方法[J]. *红外与激光工程*, 2014, **43**(11): 3597-3602.
  - 6 Sutton A J, Gerberding O, Heinzl G, et al. Digitally enhanced homodyne interferometry[J]. *Optics Express*, 2012, **20**(20): 22195-22207.
  - 7 Duan Xiaoyan, Ren Dongmei. Review of high-resolution measuring method of displacement using laser interferometer[J]. *Metrology & Measurement Technology*, 2012, **32**(6): 1-5, 13.  
段小艳,任冬梅. 激光干涉法微位移测量技术综述[J]. *计测技术*, 2012, **32**(6): 1-5, 13.
  - 8 Wu Wanduo, Huang Qiangxian, Wang Chaoqun, et al. The analysis and design of a large stroke with high-precision polarized laser interferometer system[J]. *Key Engineering Materials*, 2016, **679**: 129-134.
  - 9 Cheng Xiaofeng, Jiang Xiaodong, Zheng Wanguo, et al. Measurement of optical uniformity of KDP crystals[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2008, **35**(2): 25-28.  
程晓锋,蒋晓东,郑万国,等. KDP 晶体光学均匀性检测实验研究[J]. *光电工程*, 2008, **35**(2): 25-28.
  - 10 Han Xudong, Ai Hua. Common-path and phase-shifting single frequency laser interferometer for length measurement[J]. *Optical Technique*, 2004, **30**(2): 195-198.  
韩旭东,艾华. 共光路移相单频激光干涉测长系统[J]. *光学技术*, 2004, **30**(2): 195-198.
  - 11 Liu Zhuang, Li Yingbo, Zhang Haojun, et al. Optical design for laser four-quadrant location system based on Fresnel Lens[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2016, **43**(9): 62-66, 71.  
刘壮,李英博,张浩钧,等. 菲涅尔透镜激光四象限定位系统光学设计[J]. *光电工程*, 2016, **43**(9): 62-66, 71.
  - 12 Keem T, Gonda S, Misumi I, et al. Simple, real-time method for removing the cyclic error of a homodyne interferometer with a quadrature detector system[J]. *Applied Optics*, 2005, **44**(17): 3492-3498.
  - 13 Hu Hongbo, Yu Mei. Analysis of quadrature phase-shift error for homodyne interferometer[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2012, **39**(12): 55-62.  
胡红波,于梅. 零差激光干涉仪正交相位误差的分析[J]. *光电工程*, 2012, **39**(12): 55-62.
  - 14 Hu Pengcheng, Zhu Jinghao, Zhai Xiaoyu, et al. DC-offset-free homodyne interferometer and its nonlinearity compensation[J]. *Optics Express*, 2015, **23**(7): 8399-8408.